

論文内容の要旨

Classification of Shock Chemistry by Pre-shocked Conditions (衝撃波発生以前の分子雲の状態で分類する衝撃波化学)

山口 貴弘

宇宙空間には、星形成領域、銀河中心、超新星残骸など、至る所に衝撃波領域が存在する。通常の星間分子雲の温度は 10 K 程度であるが、衝撃波による温度上昇は 1000 K 程度にも達するため、衝撃波現象は星間雲の物理状態だけでなく、その化学組成にも大きな影響を与えていると考えられてきた。こうした衝撃波領域の化学過程を明らかにし、さらに衝撃波領域の間においてどのような類似性、または相違点が見られるかを調べるため、低質量星形成領域 L1157 mm 周辺の衝撃波領域 L1157 B1、同じく低質量星形成領域 L1448 mm 近傍の衝撃波領域 L1448 B1/R1、さらに超新星残骸 IC 443 における 1 点 G I において野辺山 45 m 望遠鏡を用いて波長 3 mm 帯の分子輝線のサーベイ観測を行った。

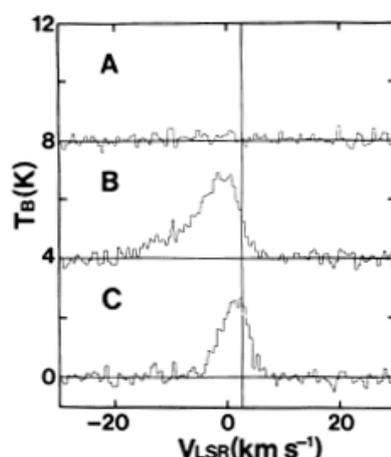
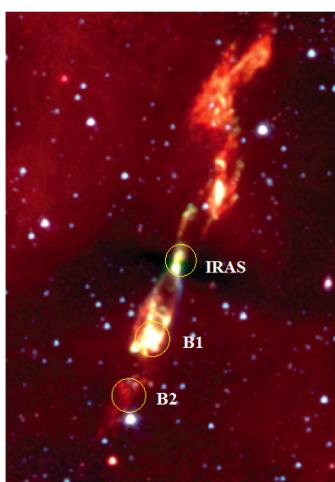


図 1: 左: Spitzer 望遠鏡による L1157 B1 衝撃波領域。右: 三上ら (1992) による SiO (2-1) ラインプロファイル。

観測、および Davis と Eisloffel (1995) による近赤外線での H_2 振動励起輝線の観測で、この領域で衝撃波が発生していることが確かめられている。分子輝線については、Avery & Chiao (1996) や Bachiller と Pérez Gutiérrez (1997) によって二原子分子などの単純な分子の観測が行われてきた。さらに Arce ら (2008)、杉村ら (2011) により $HCOOH$ 、 $HCOOCH_3$ 、 C_2H_5OH の検出が報告されている。

本論文では L1157 B1 の観測で 29 種類の分子の 130 本の輝線を検出した。複雑な有機分子については、 $HCOOH_3$ 、 CH_3CHO 、 C_2H_5OH 、などの新たな輝線に加え、 CH_3OH の吸収線 ($6_{-2,5} - 7_{-1,7} E$ 、 $3_{1,3} - 4_{0,4} A^{++}$) を検出した。これらの吸収線は、この衝撃波領域の分子ガスが熱平衡に達していないこと有力な証拠と考えられる。我々は、非平衡放射伝搬コード RADEX (van der Tak et al. 2007) を CH_3OH の 9 本のラインに適用し、ガス運動温度 64 K、 CH_3OH 柱密度 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 、 H_2 ガス密度 $2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ の条件下で観測された輝線強度をよく再現できることを確認した。また、新たに NH_2CHO という、窒素を含む有機分子を検出した。これまで大質量星形成領域では存在が確認されていたものの (e.g. Bisschop et al. 2007)、低質量星形成領域からは初めての検出である。その他、TMC-1 や Lupus 1-A といった星なしコアなどに多く存在すると考えられていた炭素鎖分子の CCS の複数のラインも検出した。この検出は、衝撃波領域における炭素鎖分子の生成という新しい課題を提起した。

L1157 B1 のラインサーベイ観測で、PN のスペクトル線を検出した (図 2)。リンを含む分子は星間雲では PN のみが知られており、これまでの検出例は大質量星形成領域についてのみであった。今回の検出で、PN が衝撃波領域で生成していることが初めて示された。そのスペクトル線の線幅から、PN が星間塵コアの破壊ではなく、星間塵マントル由来であることが示唆される。これは星間塵から蒸発した PH_3 から生成しているというモデルを支持する (Charnley and Millar 1994)。

さらに検出された主な分子について、ラインプロファイル ($V_{lsr} - \Delta v$) の比較を行った。比較の基準として 1. 星間塵コアの破壊によって生じる分子 (SiO ; $J = 2 - 1$)、2. 星間塵マントルの蒸発によって生じる分子 (CH_3OH ;

L1157 B1 (440 pc) は、原始星 IRAS 20386+6751 からの双極分子流の青方偏移成分と周辺ガスの相互作用によって生じた衝撃波領域である (図 1)。この領域は天球上で原始星から $1'$ 程度離れているため、野辺山 45 m 望遠鏡の角度分解能 (90 GHz 帯で $20''$) では、星形成活動と衝撃波現象による化学現象を完全に区別できるという利点がある。この領域は、梅本ら (1992) による CO ($J = 1-0$) の観測および三上ら (1992) による SiO スペクトルの観測

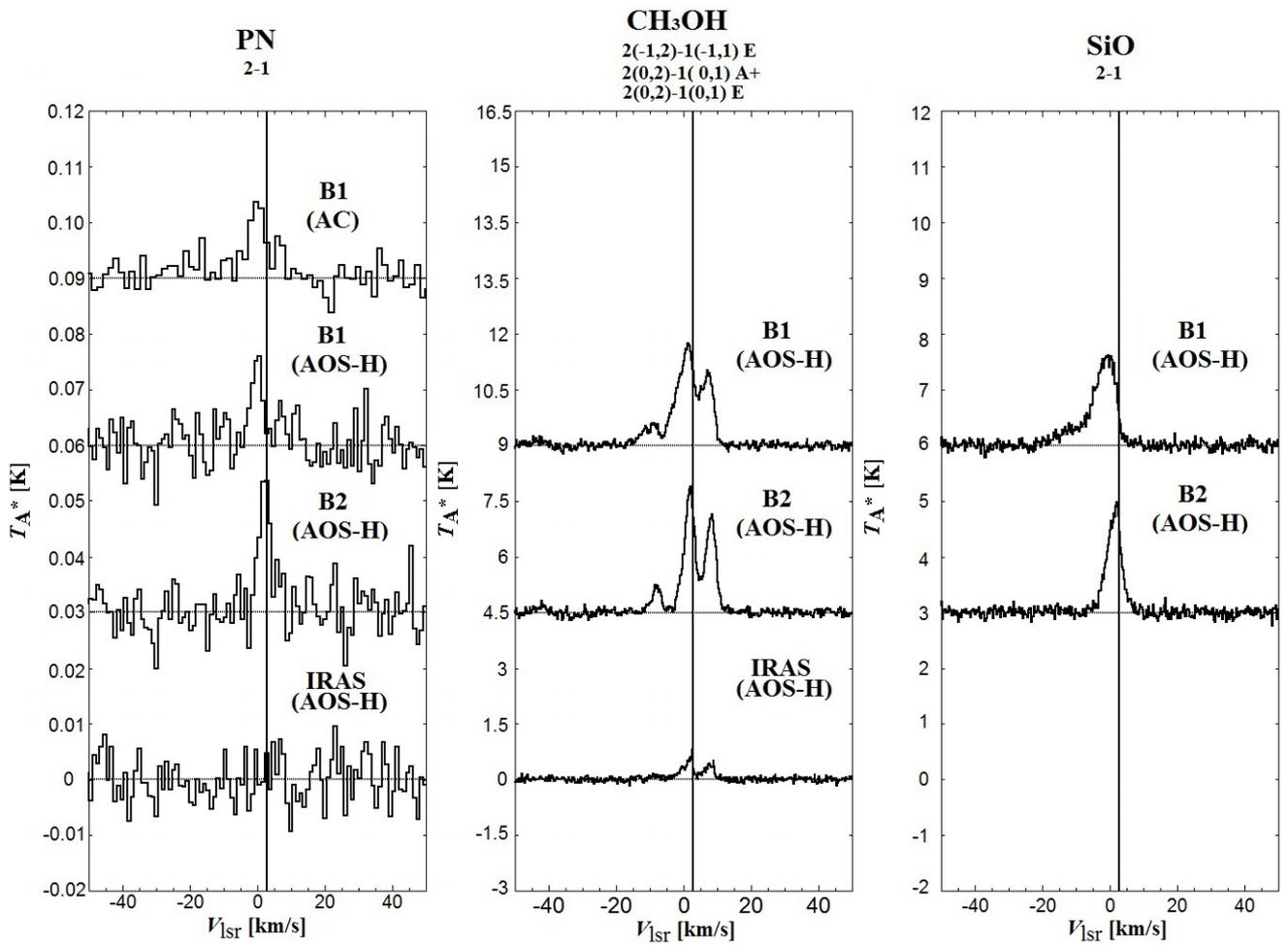


図 2: L1157 B1、B2 出観測された PN、CH₃OH、SiO のラインプロファイル。縦線は L1157 の視線速度。

5_{-1,5} - 4_{0,4} E)、3. 衝撃波領域ではなく主に周辺ガスから検出されている分子 (¹³CO; 1-0) の 3 つのラインを選んだ。L1157 B1 は双極分子流の青方偏移した成分に位置しているため、分子が強い衝撃波領域に存在するほどラインのピーク速度は減少し、速度幅は広くなる傾向がある (図 3)。

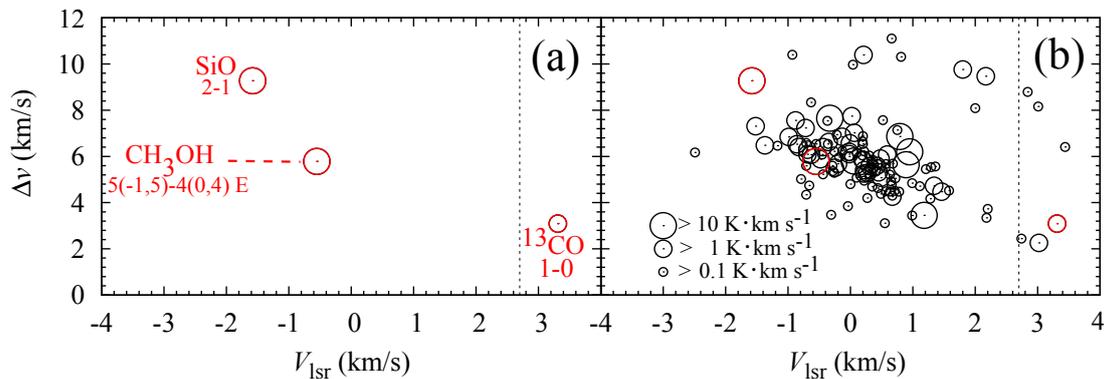


図 3: (a): SiO ($J = 2 - 1$)、CH₃OH (5_{-1,5} - 4_{0,4})、¹³CO (1-0) のラインプロファイルの $V_{\text{LSR}} - \Delta v$ 相関図。(b): 検出された全分子の $V_{\text{LSR}} - \Delta v$ 相関図。円の大きさはライン強度を近似的に表す。 $V_{\text{LSR}} = 2.7 \text{ km s}^{-1}$ の縦の破線は L1157 分子雲の視線速度を表す。

まず、複雑な有機分子のラインプロファイルは CH₃CHO で若干 CH₃OH (5_{-1,5} - 4_{0,4} E) と異なる傾向が見られた。一方、HCOOCH₃、HCOOH などの複雑な有機分子はのラインプロファイルは、CH₃OH に近い傾向を示し、SiO のように星間塵コアの破壊ではなく、星間塵マンツルの蒸発によって発生していることと矛盾しない。CS、SO、SO₂ などの硫黄を含む分子のラインプロファイルは、SiO ($J = 2 - 1$) に比べるとピーク速度は青方偏移しておらず、速度幅は細い傾向が見られた。これは、これらの硫黄を含む分子が、星間塵マンツル上にある H₂S の蒸発により、気相反応によって生成されるというモデルを裏付けるものである。

L1157 B1 で検出された主な分子の柱密度を CH₃OH の柱密度に対する比に換算し、低質量星形成領域 IRAS 16293-2422、大質量星形成領域 Sgr B2(N)、Orion KL (Hot Core と Compact Ridge) という他の 4 つの領域と比較を行った。その結果、CS、SO、SO₂ などの、L1157 B1 の双極分子流の力学的年齢 $1.8 \times 10^4 \text{ yr}$ で気相反応に

よって十分生成される分子については各領域で明瞭な差異はなかった。一方、 HCOOCH_3 、 HCOOH 、 CH_3CHO などの複雑な有機分子は、IRAS 16293-2422 が、他の領域よりも 1 桁以上高い傾向が見られた。これは L1157 B1 では様々な有機分子が検出されたとはいえ、衝撃波を受ける前の状態では複雑な有機分子がそれほど多量には生成されていなかったことを示していると考えられる。

次に、低質量星形成領域 L1448 mm 周辺の衝撃波領域 L1448 B1/R1 で同じくラインサーベイ観測を行った。L1448 mm はペルセウス座にある $0.03\text{-}0.09 M_\odot$ 程度の低質量原始星であり、超高速な双極分子流 (extremely high velocity outflow; EHV) を出している。最大の速度成分は 80 km s^{-1} 程度にも達する。この双極分子流中にはいくつかの瘤状の衝撃波領域が存在しており、B1、R1 はそれぞれ青方偏移成分、赤方偏移した成分のうち、もっとも原始星に近い領域である。これらの衝撃波領域は双極分子流内で発生していると考えられており、周辺ガスとの相互作用で生成したと考えられる L1157 B1 とは異なっている。L1448 B1、R1 衝撃波領域は $20''$ という野辺山 45 m 望遠鏡のビームサイズに同時に収まるため、今回は原始星を視野の中心に入れ、原始星 L1448 mm、B1、R1 を同時にラインサーベイ観測した。

その結果、26 種類の分子の 115 本のラインを検出したものの、それらのほとんどは細い線幅 ($2\text{-}3 \text{ km s}^{-1}$) から考えて原始星 L1448 mm の方向からのものだった。しかし、 SiO ($J = 2 - 1$) と SO ($J_N = 3_2 - 2_1$) のみは EHV を特徴付ける極端に幅の広い ($\sim 30 \text{ km s}^{-1}$) ラインプロファイルを示した。これは、L1157 B1 では SiO だけでなく、 HNCO 、 HCN 、 CS 、 SO_2 、 CH_3OH などといった様々な分子が衝撃波領域から検出されていることと大きく異なる結果であった。 CH_3OH は、 SiO とともに衝撃波領域を特徴づける分子と考えられてきた。しかし、今回 L1448 B1、R1 という 2 つの衝撃波領域からは検出されなかったことは注目に値する。星間分子雲における、 CH_3OH を初めとした飽和した有機分子の生成には星間塵マントル上での反応が重要と考えられる。L1448 B1/R1 における星間塵はすでに原始星 L1448 mm での星形成活動を経てマントルが蒸発したものとなっている可能性が高い。そのため、衝撃波が発生してもそれによって蒸発する CH_3OH が初めから星間塵上になかったと考えられる。この結果から、衝撃波化学の性質を決めるには、衝撃波発生以前の星間塵の性質が重要であるということがわかった。

さらに、超新星残骸 IC 443

の 1 点、G I においてラインサーベイ観測を行った。超新星残骸における衝撃波は、周辺の広大な希薄ガスを凝集させ、球殻状の構造を生み出す。IC 443 自体も直径数 $\sim 100 \text{ pc}$ 程度の広がった構造をもっており、星形成領域の一部であった L1157 B1 とは異なる化学組成が見られると予想された。分子の回転輝線については、van Dishoeck ら (1993) がラインサーベイを行い、 CS 、 HCN 、 SO 、 SiO 、 H_2CO といった基本的な分子のラインを検出した。しかし化学組成を正確に把握するためには、3 mm 帯の観測が求められる。我々は、78-116 GHz 帯の全域にわたる観測を行った。その結果、14 種類の分子の、44 本のラインを検出した。それらの中には、van Dishoeck ら (1993) によって検出された CS 、 HCN 、 SO 、 SiO といった基本的な分子に加え、この領域では初めての検出となる CH_3OH ($2_K - 1_K$)、 HC_3N (10-9、11-10、12-10) のラインも含まれる。

複雑な有機分子は、 CH_3OH 以外には IC 443 G I からは検出されず、これは衝撃波発生以前のこの領域の分子雲が希薄な光離解領域であり、星間塵マントル上での生成反応があまり進行しなかったためであると考えられる。炭素

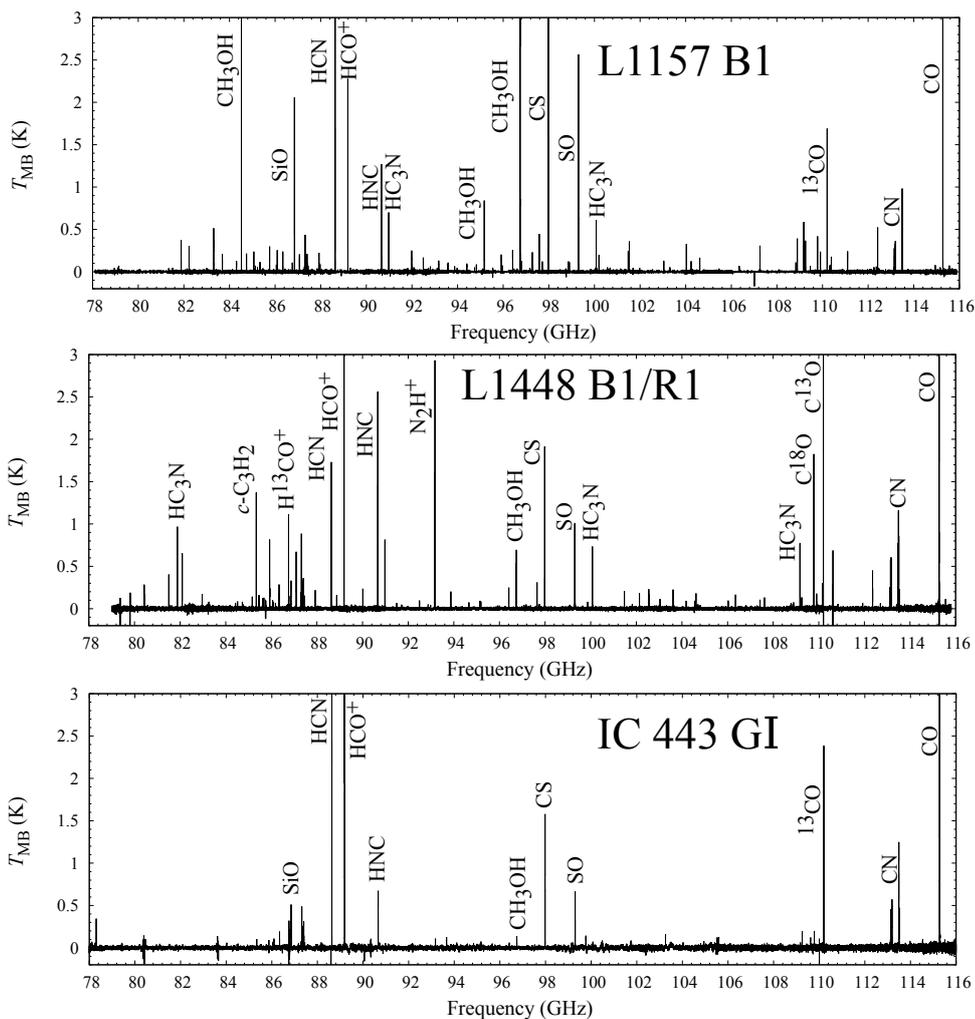


図 4: L1157 B1、L1448 mm、IC 443 G I で検出された全スペクトル。

鎖分子は、 C_2H 、 $c-C_3H_2$ 、といった分子は検出できたものの、L1157 B1 で検出された CCS は検出されなかった。一方、硫黄を含む分子では、CS、 $C^{34}S$ 、SO、 ^{34}SO などを検出した。しかし、L1157 B1 では SO と同程度の存在量が確認された SO_2 は暫定的な検出にとどまった。また、OCS、 H_2CS といった分子は検出できなかった。

CH_3OH の H_2 分子に対する存在比は、は IC 443 G I では 2.8×10^{-8} 程度であるのに対し、暗黒星雲 TMC-1 では 2×10^{-9} である。これは、衝撃波によって CH_3OH の存在量が増加していることを示している。この他、硫黄を含む分子である SO や CS の存在比も TMC-1 より高い傾向にあり、衝撃波によって存在比が増加している可能性を示している。一方 HC_3N は、IC 443 G I では 3×10^{-10} 程度の存在比であるのに対し、TMC-1 では 6×10^{-9} である。これは、 HC_3N が衝撃波発生以前の段階では十分に生成されておらず、衝撃波発生後もそれほど存在比が増加しないことを示していると考えられる。

以上の結果をふまえ、L1157 B1、L1448 B1/R1、IC 443 G I についての各衝撃波領域の化学組成の違いがどのようにして生じたか考察した。まず、 H_2 密度については、L1448 B1、IC 443 G I でそれぞれ $\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 程度であるのに対し、L1157 B1 では $\sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 程度と約 1 桁小さい。一方で検出された分子種は L1157 B1 で 29 種類、L1448 B1 で 3 種類、IC 443 G I で 14 種類であり、L1157 B1 で最も多い結果となった。これは、L1448 B1/R1 や IC 443 G I では衝撃波発生以前に温度が上昇し、CO はほとんどが星間塵上ではなく気相中に蒸発してきていると考えられる。 CH_3OH 、 $HCOOCH_3$ 、 $HCOOH$ などの複雑な有機分子の生成には、星間塵上に付着した CO への付加反応が重要であると考えられている。衝撃波発生以前に光解離領域だったと考えられる IC 443 G I で CH_3OH 以外に複雑な有機分子が検出されず、 CH_3OH も L1157 B1 ほど多くないことは、この考えと矛盾しない。さらに、一方で気相反応で生成すると考えられる SO や CS は L1157 B1 と IC 443 G I とで同程度であることから、両分子が主に衝撃波発生後の化学過程によって生成している可能性を示している。また、L1448 B1/R1 では SiO 、SO 以外の分子はほとんど存在していないという結果も、原始星での星形成活動によって星間塵マントルがほとんど蒸発してしまっているからであると考えると妥当な結果である。以上の結果より、衝撃波領域の化学組成は、衝撃波発生以前の星間塵マントルの化学組成に大きく依存していることがわかった。

	L1157 B1	L1448 B1	IC 443 G I
Shock Origin	Outflow	High Velocity Jet	Supernova
Shock Velocity	10 km s^{-1}	40 km s^{-1}	15 km s^{-1}
Mach Number	20	80	30
Average Temperature	100 K	300 K	100 K
Average Density	$2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$	$8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$	$1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
Detected Species	29	3	14
Chemistry	Rich	Poor	Moderate

表 1: L1157 B1、L1448 B1、IC 443 G I 各衝撃波領域の特徴